پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دورهٔ ۵۲، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۹۹
ص ۶۸۷- ۶۷۳

مدل‌سازی تکنیک‌های بُرداری در ناحیه‌بندی مناطق همگن گردوغباری در ایران

کاوه محمدپور* ـ دکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکدهٔ علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۵

چکیده

گردوغبارهای معدنی تحت عنوان عمده‌ترین نوع از هواویزه‌های وردسپهر هستند که تحت تأثیر تعامل سامانهٔ جو- زمین هستند و اغلب درنتیجهٔ شرایط آب و هوایی خشک و سرعت بالای باد ایجاد می‌شوند و مناطق حومه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در تحقیق حاضر، با استفاده از داده‌های روزانه عمق نوری گردوغبار در ۵۵۰ نانومتر بر روی گسترهٔ ایران، سعی شد مناطق همگن گردوغباری بر روی ایران با استفاده از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی مدل‌سازی و طبقه‌بندی شود. بر پایهٔ روش تحقیق، ایران به شش منطقهٔ مجزای شمال شرق، غرب- شمال‌غرب، جنوب‌شرق، جنوب‌غرب، فلات مرکزی، و شرق ایران تفکیک شد که از مراکز عمدهٔ تحت تأثیر گردوغبارند. پراکنش رخدادهای حدی نیز نشان داد که شکل‌گیری هر کدام از مناطق شناسایی‌شده به دوری و نزدیکی آن‌ها نسبت به مناطق مختلف منبع گردوغبار بستگی دارد و شکل‌گیری هر منطقه بر روی جو ایران تابع رشد، گسترش، و طغیان رژیم‌های گردوغباری در سطح منطقه‌ای است. درنهایت، تکنیک‌های به‌کارگرفته‌شده موجب شد تا گردوغبار در قالب ساختارهای ساده و معنی‌دار فیزیکی ارائه و درک روشنی از مفهوم پراکنش جغرافیایی پدیده نمایان شود.

واژگان کلیدی: ایران، تحلیل مؤلفه‌های اصلی، عمق نوری گردوغبار، ناحیه‌بندی.

مقدمه

گردوغبارهای معدنی تحت عنوان عمده‌ترین نوع از هواویزه‌های وردسپهر به صورت مستقیم انتقال انرژی تابشی (جذب و پخش تابش) (اسلام و المزروعی، ۲۰۱۲: ۲۲۳۹؛ داس و همکاران، ۲۰۱۵: ۹۶۴۲) و غیرمستقیم (ویژگی‌های میکروفیزیک، تشکیل هستهٔ تراکم و نوری) (بانگرت و همکاران، ۲۰۱۲: ۴۰۴۵) را تحت تأثیر قرار می‌دهند. از روش‌های متعددی برای شناسایی مناطق منبع، مناطق تحت تأثیر، و تعیین رخدادهای گردوغبار در دو دههٔ اخیر استفاده شده است. از میان این روش‌ها، برخی پژوهشگران از مقدار نشانگر هواویزه (پروسپرو و همکاران، ۲۰۰۲: ۲؛ آوات و ماشات، ۲۰۱۴: ۸۸۹؛ نبوی و همکاران، ۲۰۱۶: ۹۳)، عمق نوری هواویزه (گیکاس و همکاران، ۲۰۰۹: ۳۵۰۹؛ راشکی و همکاران، ۲۰۱۵: ۳۵؛ نبوی و همکاران، ۲۰۱۶: ۹۳؛ کاسکائوتیس و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۶)، مشاهدات زمینی و سینوپ‌های هواشناسی (ذوالجودی و همکاران، ۲۰۱۳: ۳۲۱؛ علیزاده چوبری و همکاران، ۲۰۱۴؛ راشکی و همکاران، ۲۰۱۵: ۳۵؛ نبوی و همکاران، ۲۰۱۶: ۹۳)، مدل‌های منطقه‌ای و جهانی (کاسکائوتیس و همکاران، ۲۰۱۵: ۴۰۷؛ نبوی و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۱۵)، یا ترکیبی از مدل‌ها و داده‌های ماهواره‌ای و زمینی به‌صورت موردی برای تشخیص و توصیف گردوغبار استفاده کرده‌اند. به‌عنوان نمونه، طوفان‌های گسترده و منابع تولید گردوغبار در خاورمیانه بر اساس نشانگر هواویزه (نبوی و همکاران، ۲۰۱۶: ۹۳) و عمق نوری هواویزه اندازه‌گیری‌شده به‌وسیلهٔ سنجنده‌ها (کلینگ مولر و همکاران، ۲۰۱۶: ۵۰۶۳)،

* نویسندهٔ مسئول، تلفن: ۰۹۱۴۴۱۷۱۲۷۷ Email: Std_K.m@khu.ac.ir

ایستگاه‌های زمینی و دید افقی ایستگاه‌های هواشناسی (باغبانان و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۴۴۷؛ علیزاده چوبری و همکاران، ۲۰۱۴: ۳۲۸) مشخص شده است.

توزیع گردوغبار بر روی ایران در طی فصول مختلف نشان داد که تغییرات چشم‌گیر در چرخۀ گردوغبار (ایجاد، انتشار، انتقال، جمع‌آوری، ته‌نشست) با الگوهای روزانۀ هوا، شرایط خاک، خشک‌سالی، و وضعیت توپوگرافی ارتباط قوی دارند. این تأثیرگذاری گردوغبار در مناطق مختلف کشور از جمله شرق، غرب و جنوب‌غرب، شمال‌شرق (بلورانی و همکاران، ۲۰۱۴: ۱۲۴؛ نبوی و همکاران، ۲۰۱۶: ۹۳؛ کاسکائوتیس و همکاران، ۲۰۱۶: ۱۰؛ کاسکائوتیس و همکاران، ۲۰۱۵: ۴۰۷)، خوشه‌بندی و تحلیل فصلی دید افقی (باغبانان و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۴۴۷؛ علیزاده چوبری و همکاران، ۲۰۱۴: ۳۳۰)، یا شناسایی نقطه‌ای رخدادها (آرکیان و نیکلسون، ۲۰۱۸: ۲؛ نامداری و همکاران، ۲۰۱۸؛ علیزاده چوبری و همکاران، ۲۰۱۶) بر روی پهنۀ ایران مستند شده است. به‌عنوان مثال، بلورانی و همکاران (۲۰۱۴) رخدادهای گردوغبار را با استفاده از دید افقی شناسایی کردند و در تحقیق خود نشان دادند که بیشتر طوفان‌های گردوغبار واردشده به ایران از بیابان‌های عراق و سوریه سرچشمه گرفته‌اند. در تحقیق دیگری، علیزاده چوبری و همکاران (۲۰۱۶)، با استفاده از دید افقی ایستگاه‌های هواشناسی، پنج منطقۀ عمدۀ رخداد گردوغبار را شناسایی کردند که دارای بیشترین بار گردوغبار بودند. تحقیقات دیگر بر روی جنوب غرب آسیا نیز نشان داد که خاورمیانه شاهد بیشترین و شدیدترین طوفان‌های گردوغباری در دو دهۀ اخیر بوده است. به‌عنوان نمونه، نبوی و همکاران (۲۰۱۶)، با استفاده از داده‌های سنجش از دور، نشان دادند بخش‌های جنوب غربی ایران و کشورهای حاشیۀ خلیج فارس از جمله عمده‌ترین مناطق تحت تأثیر گردوغبار در منطقۀ غرب آسیا می‌باشند. مؤلفان همچنین نشان دادند طوفان‌های گردوغبار در فصل بهار عمدتاً به غرب ایران برخورد کرده و تا دریای خزر گسترش یافته‌اند. همچنین، چائو و همکاران (۲۰۱۵)، با استفاده از متغیرهای توپوگرافی، هواشناسی، و ویژگی‌های خاک در مقیاس محلی، نشان دادند که رسوبات بستر تالاب‌های الهویزه و هورالعظیم در استان خوزستان و دشت سیستان در استان سیستان و بلوچستان به‌عنوان منابع داخلی تولید گردوغبار در ایران محسوب می‌شوند. علاوه بر تحقیقات مشابه، دو منطقۀ خشک عمده در داخل فلات مرکزی (دشت کویر در مرکز شمالی ایران و دشت لوت در شرق ایران) و بستر خشک جازموریان در جنوب‌شرق ایران (میدلتون، ۱۹۸۶: ۸۳؛ گودی و میدلتون، ۲۰۰۶: ۱۰۷؛ عبدی ویشکایی و همکاران، ۲۰۱۱: ۲) همراه با دشت‌های ساحلی خلیج‌فارس، دشت‌های ساحلی مکران، بسترهای خشک لسی و رسوبی سیستان و خوزستان نیز از جمله منابع بالقوۀ داخلی تولید گردوغبار از منابع بالقوۀ گردوغبارهای معدنی در ایران به‌شمار می‌آیند (راشکی و همکاران، ۲۰۱۲: ۵۱؛ رضازاده و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۰۳؛ راشکی و همکاران، ۲۰۱۵: ۳۵). اگرچه همۀ مناطق ذکرشدۀ بالا به‌عنوان منابع داخلی تولید گردوغبار قابل ملاحظه‌اند، به‌وسیلۀ شرایط دینامیکی و آب و هوایی تحت تأثیر گردوغبارهای بیابان‌های خشک و مناطق نیمه‌خشک بیرونی نیز هستند (فتاحی و همکاران، ۲۰۱۲: ۴۹؛ ذوالجودی و همکاران، ۲۰۱۳: ۳۲۱؛ حمیدی و همکاران، ۲۰۱۳: ۲۷۹؛ حمیدی و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۳۳؛ کاسکائوتیس و همکاران، ۲۰۱۵: ۴۰۷؛ راشکی و همکاران، ۲۰۱۹: ۲۷). بنابراین، شرایط فوق‌العادۀ خشک در داخل ایران با منابع بیرونی گردوغبار تلفیق و موجب شده است تا کشور تحت تأثیر هواویزه‌های معدنی بالا قرار داشته باشد. پس، بسته به تنوع و تعدد منابع تولید گردوغبار و رژیم‌های غالب اثرگذار بر روی ایران، امکان بررسی تفکیک کشور به مناطق مختلف یک ضرورت به‌نظر می‌رسد؛ زیرا، با توجه به تحقیقات ارزشمند بالا در عرصۀ گردوغباری ایران، هیچ گونه ناحیه‌بندی گردوغباری با استفاده از متغیرهای سنجش از دوری در سطح ایران انجام نشده است تا هم کشور را به زیرمنطقه‌هایی جداگانه تفکیک کند و الگوهای مکانی و تغییرات روزانۀ گردوغبار هر منطقه را مشخص نماید و هم از معیار سنجش از دوری ماهواره‌ای برای تفکیک مناطق کمک بگیرد؛ زیرا سنجش از دوری

ماهواره‌ای کمک می‌کند تا درک بهتری از پهنهٔ جغرافیایی پدیده آشکار شود و لایهٔ گردوغبار در سطح‌های بالای وردسپهر پایش و نمایش داده شود. همان مسئله‌ای که به‌وسیلهٔ دید افقی ایستگاه مورد مطالعه مقدور نیست. این همان موضوعی است که می‌تواند از هدف و سؤال تحقیق رونمایی کند و سیمای کلی منطقهٔ مورد مطالعه را بدون توجه به مرز استانی و در ساختارهای کوچک‌تر و ساده‌تر به همراه تغییرات منطقه‌ای نشان دهد. بر این اساس، نگارنده در تحقیق حاضر می‌کوشد تا پراکنش گردوغبار در یک محیط فیزیکی و جغرافیایی معنی‌دار را ترسیم و قابل تفسیر کند.

مواد و روش‌ها

روش‌شناسی تکنیک‌های بُرداری با هدف کاهش حجم زیاد داده برای تفسیر و طبقه‌بندی‌های آب و هواشناسی و الگوهای مکانی (هوث و همکاران، ۱۹۹۳: ۸۱۷؛ هوث، ۱۹۹۶: ۸۹۳)، منطقه‌بندی اقلیمی و تغییرات فضایی (سرا و همکاران، ۱۹۹۶: ۱۷۵؛ وایت و همکاران، ۱۹۹۱: ۲)، الگوهای گردش جوی، و بسیاری از طبقه‌بندی‌های مشابه دیگر کاربرد دارد (یارنال، ۱۹۹۳: ۱۲۶؛ باری و کارلسون، ۲۰۰۱: ۱۲۰؛ یارنال و همکاران، ۲۰۰۱: ۱۹۲۳). از جمله این روش‌شناسی می‌توان به تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)[۱] یا توابع متعامد تجربی (EOFs)[۲] اشاره کرد که، ضمن کاهش حجم داده‌ها، تغییرات موجود در داده‌ها و پراش اولیهٔ آن‌ها را حفظ و در دسته‌هایی مشخصی از هم جدا می‌نماید (ریچمن، ۱۹۸۶: ۲۹۸). پس، با توجه به ماهیت داده‌های مورد استفاده در تحقیق و تلاش در جهت تعیین ساختار فیزیکی ساده، PCA به‌عنوان یک تکنیک مناسب برای اهداف تحقیق حاضر در راستای طبقه‌بندی پدیدهٔ گردوغبار کاربردی است؛ زیرا بردارهای ویژه قادر به جداسازی پراش‌های مشابه‌اند و در عین شباهت درون‌گروهی، تغییرات سری زمانی هر بردار نیز بیرون کشیده می‌شود. بنابراین، متغیر عمق نوری گردوغبار[۳] در ۵۵۰ نانومتر سنجندهٔ MODIS، که در مدل MACC مدل‌سازی شده است، به‌کار گرفته شد. این متغیر به‌صورت پیکسلی با ۱۴ کیلومتر مربع تفکیک مکانی و زمانی روزانه در طی سال‌های ۲۰۰۳–۲۰۱۲ است (بندیتی و همکاران، ۲۰۰۹: ۲؛ مورکرت و همکاران، ۲۰۰۹: ۲).

در راستای رسیدن به هدف مطالعه، تعیین مُد معیار (O, P, Q, R, S, T) در تکنیک‌های برداری دومرحله‌ای پایه‌ای است (ریچمن، ۱۹۸۶: ۲۹۳؛ ریچمن، ۱۹۸۱: ۱۱۴۵؛ وایت و همکاران، ۱۹۹۱: ۲؛ یارنال، ۱۹۹۳: ۱۱۷) که، با توجه به ماهیت توزیع ماتریس و هدف مطالعه، رویکردی از آرایهٔ S به‌کار گرفته شد. در آرایهٔ S اگر ستون داده‌های ورودی در ماتریس Z تحت عنوان متغیرهای ریاضی اعمال شده باشند، ماتریس Z دارای n متغیر در سری‌های زمانی مورد مطالعه و m گام زمانی است ($m \times n$). به این معنی که سری‌های زمانی (۳۶۵۴ روز) در هر n ایستگاه یا نقطه (۹۹۸۵ نقطه) در تحلیل اعمال می‌شود. سپس، ماتریس داده‌های فوق از نظر آماری (KMO)[۴] (سرنی و کیسر، ۱۹۷۷: ۴۳) برابر با ۰٫۹۹ (عالی) ارزیابی شد؛ معیاری که قابلیت ماتریس را جهت اجرای تحلیل ارزیابی می‌کند. سپس، برای استخراج بُردارهای ویژه از ماتریس همبستگی استفاده شد. استفاده از ماتریس همبستگی موجب می‌شود داده‌ها نیازی به نرمال‌سازی نداشته باشند (کستپولو و جونس، ۲۰۰۷: ۱۱۸۹) و بهترین نمایش پراش در داده‌ها تهیه و نمایش داده شود (باری و کارلسون، ۲۰۰۱: ۱۳۱؛ ژولیف، ۲۰۰۲: ۲۷۱). در ادامه، از تست غربالگری[۵] (کتل، ۱۹۶۶: ۲۴۵) و قانون نورث (نورث و همکاران، ۱۹۸۲: ۶۹۹) استفاده شد تا تعداد بُردارهای ویژهٔ اصلی انتخاب شوند. سپس، برای تفکیک مُد اختصاصی مؤلفه‌های باقی‌مانده و در راستای تعیین

1. Principal Component Analysis
2. Experimental Orthogonal Functions
3. Dust AOD (Aerosol Optical Depth)
4. Kaiser-Meyer-Olkin test
5. Scree plot

بهترین نمایش تئوریکی داده‌ها و روابط فیزیکی جاسازی‌شده در داخل ماتریس ورودی (ریچمن، ۱۹۸۶: ۲۹۸؛ کمپاگنووسی و سالز، ۱۹۹۷: ۶۳۵) از چرخش عمودی (کیسر، ۱۹۵۸: ۱۸۷؛ کیسر، ۱۹۵۹: ۴۱۳) استفاده شد تا تحلیل مکانی مؤلفه‌های اصلی را ساده‌تر کند (یارنال، ۱۹۹۳: ۱۴۲) و در عین حال محدودیت تعامد و حالت عمودی بُردارهای ویژه را نگه دارد (ریچمن، ۱۹۸۶: ۱۱۵۲). همچنین، ساختار بار گویه‌ها را به ساده‌ترین شکل ممکن (با به حداکثر رساندن ضرایب همبستگی بین هر مؤلفهٔ چرخش‌داده‌شده با مؤلفهٔ اولیه) نشان می‌دهد (ژولیف و همکاران، ۲۰۰۲: ۲۷۴). به این صورت که الگوهای چرخش‌داده‌شده دارای ساختار ساده‌تر، قابل تفسیرتر، و منطقی‌تری از پراکنش متغیر را نشان می‌دهند. پس، اگر مؤلفه‌های انتخاب‌شده دارای مفهوم فیزیکی (الگو) نباشند، استفاده از چرخش برای کل پراش‌های محاسبه‌شده در مؤلفه‌های انتخابی به‌کار گرفته می‌شود و این چرخش موجب می‌شود در همهٔ فاکتورهایی که پراش‌های تشریح‌شده را دارای اختلال[1] می‌کند بچرخد و آن‌ها را کاملاً از هم جدا کند (ریچمن، ۱۹۸۶: ۱۱۵۴؛ کمپاگنووسی و سالز، ۱۹۹۷: ۶۴۱). بدین ترتیب، نقشهٔ مکانی گردوغبار بر پایهٔ بارگویه‌های معنی‌دار یا بردارهای ویژهٔ باقی‌مانده استخراج و ارائه شد.

برای تفکیک مرز مناطق از صدک ۸۷ مقدار بارگویه‌ها و برای انتخاب سیگنال‌های مناسب فرین‌ها از صدک ۹۵ بی‌هنجاری‌های روزانه استفاده شد؛ زیرا صدک ۸۷ موجب شد تا مناطق شناسایی‌شده با همدیگر همپوشانی نداشته باشند و کاملاً از همدیگر جدا شوند. درنهایت، سری زمانی مناطق شناسایی‌شده با استفاده از آزمون کلموگروف- اسمیرنوف[2] (KS) بررسی شد. این آزمون آماری ناپارامتریک است و با استفاده از آمارهٔ D آزمون (وانگ و همکاران، ۲۰۰۸؛ شن و همکاران، ۲۰۱۵) می‌توان فاصلهٔ معنی‌دار میانگین سری‌های زمانی منطقه‌های به‌دست‌آمده (در هر ۱۶۸۶۸ کیلومتر مربع) را نسبت به هم نشان داد و استقلال عددی هر منطقه نسبت به دیگری از نظر آماری سنجیده شود. آمارهٔ D بیان می‌کند که میزان بالای عددی یک میانگین نسبت به دیگری نشان‌دهندهٔ فاصلهٔ زیاد بین دو میانگین است. بنابراین، دو میانگین مستقل از هم و دارای تغییرات متفاوتی‌اند.

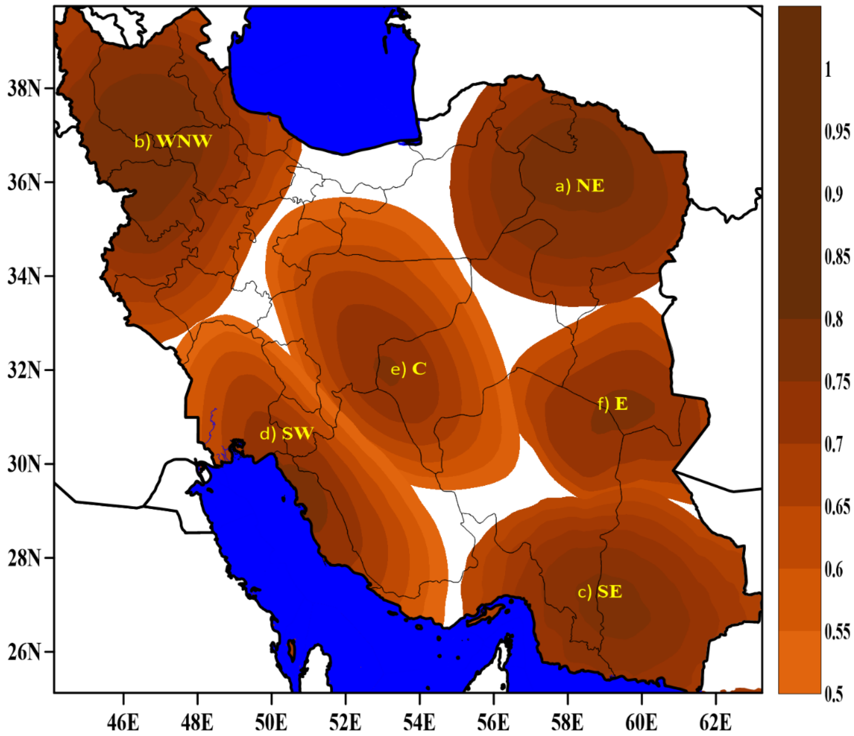
یافته‌های تحقیق

مؤلفه‌های اصلی باقی‌مانده با ۹۱ درصد پراش داده‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. درصد پراش پیش و پس از چرخش مؤلفه‌ها در جدول ۱ نشان می‌دهد که بیشترین میزان پراش داده‌ها پیش از چرخش به مؤلفهٔ نخست تعلق دارد. اما، چرخش عمودی موجب شد تا پراش‌ها در بین مؤلفه‌ها تقسیم و فیزیک بهتری از توزیع داده‌ها را نشان دهند.

جدول ۱. درصد کل پراش‌های پیش و پس از چرخش به روش عمودی

مؤلفه	بدون چرخش		چرخش عمودی	
	پراش(%)	پراش تجمعی(%) .	پراش(%)	پراش تجمعی(%) .
۱	۶۵٫۱۵	۶۵٫۱۵	۲۴٫۹	۲۴٫۹
۲	۱۱٫۰۷	۷۶٫۲۲	۲۲٫۳	۴۷٫۲
۳	۶٫۳۹	۸۲٫۶۲	۲۲٫۲	۶۹٫۴
۴	۳٫۵۵	۸۶٫۱۷	۹٫۲	۸۷٫۶
۵	۲٫۶۵	۸۸٫۸۳	۷٫۷	۸۳٫۳
۶	۲٫۱۴	۹۰٫۹۷	۴٫۶	۹۰٫۹۷

1. Noise
2. Kolmogorov-Smirnov

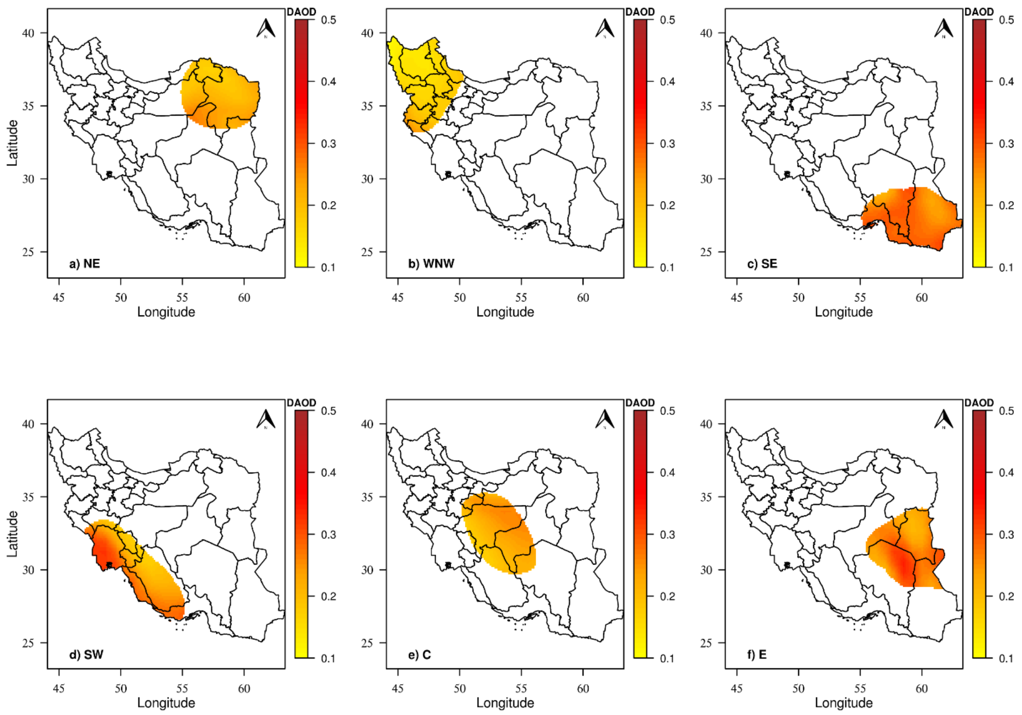


شکل ۱. نقشهٔ تغییرات بار مُدهای مکانی مناطق تفکیک‌شدهٔ گردوغبار (شمال‌شرق: NE، غرب و شمال‌غرب: WNW، جنوب‌شرق: SE، جنوب‌غرب: SW، فلات مرکزی: C، شرق: E)

شکل ۱ نقشهٔ پراکنش مکانی گردوغبار ایران را به شکل یک ناحیه‌بندی منسجم و جامع نشان می‌دهد که حاصل بیشینهٔ بارگویهٔ مؤلفه‌های اصلی است. در این شکل، اولین منطقهٔ گردوغباری ایران در گوشهٔ شمال شرقی کشور با بار بیش از ۰/۵ (شکل a۱) تقریباً جو شش استان کشور (شامل شرق گلستان، خراسان شمالی، خراسان رضوی، بخش‌هایی از شرق سمنان، شمال خراسان جنوبی، و شمال شرق یزد) را دربر می‌گیرد که غلظت بالای مقدار سالانهٔ آن در دامنهٔ غربی ارتفاعات شمال‌شرق و در جنوب‌غرب منطقهٔ شناسایی‌شده قابل مشاهده است (شکل ۲ a). تغییرات فصلی مقدار گردوغبارهای منطقهٔ شمال‌شرق در شکل a۳ نشان می‌دهد که مقدار عمق نوری گردوغبار از سال ۲۰۰۸ تا پایان دورهٔ مورد مطالعه افزایش چشم‌گیری دارد و مقدار اوج آن در اواخر بهار چرخهٔ سالانه است. منطقهٔ گردوغباری شمال‌شرق با منابع تولید گردوغبار همچون بیابان بزرگ قره‌قوم (واقع در کشور ترکمنستان) و دشت کویر (بیابان داخلی کویر) همجوار است (شکل ۴ a). بنابراین، موقعیت جغرافیایی و شرایط دینامیکی موجب شده است تا جو نیمهٔ شرقی ایران تحت تأثیر انتشار و انتقال طوفان‌های شدید برخاسته از بیابان قره‌قوم باشد که عمدتاً بخش شمال‌شرقی ایران را در طول مرز افغانستان و تا مرکز ایران تحت تأثیر قرار می‌دهد.

دومین منطقهٔ گردوغباری شناسایی‌شده متعلق به غرب– شمال‌غرب کشور است (شکل ۱ b) که از شمال استان ایلام با غلظت بالای گردوغبار شروع و تا غرب دریای خزر کل استان‌های غربی و شمال‌غربی کشور را دربر می‌گیرد (شکل ۲ b). سری‌های زمانی تغییرات فصلی گردوغبار در شکل (۳ b) نشان می‌دهد که گردوغبارهای منطقهٔ شمال‌غرب از بهار به‌تدریج تا وسط سری‌های زمانی سالانه (تابستان) روند افزایشی دارند. منطقهٔ شمال‌غرب از جمله مناطقی است که علاوه بر گردوغبارهای منتشرشده از بیابان‌های بیرونی، از مناطق رسوبی و شنزار شمال شرق دریاچهٔ ارومیه نیز تغذیه

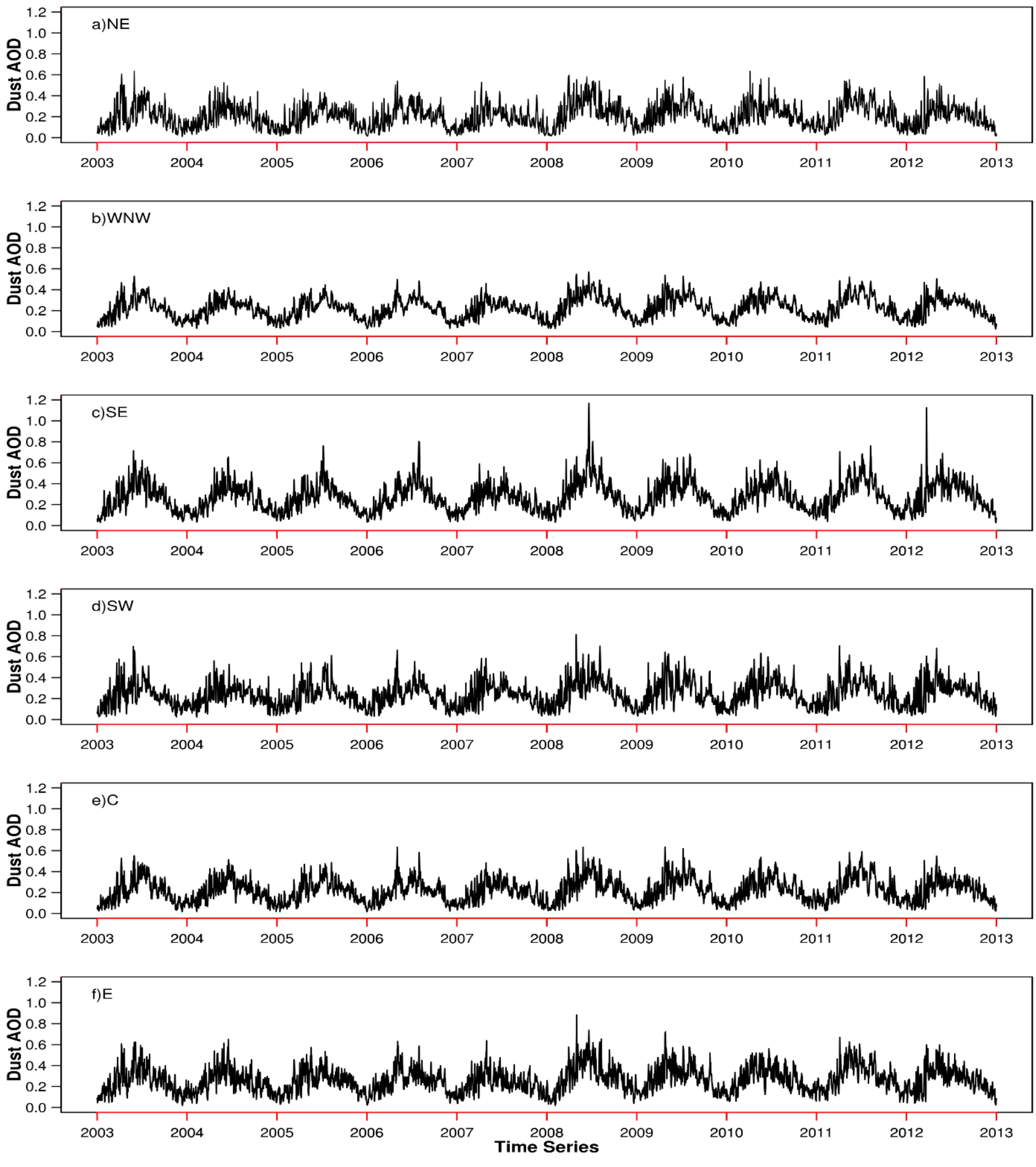
می‌شود (شکل ۴ b). سومین منطقهٔ شناسایی‌شده گردوغبار شامل همهٔ نواحی ساحلی و جنوب‌شرق ایران با بار بیش از ۰٫۵ (شکل c۱) از جمله استان‌های جنوب‌شرق فارس، بخش بزرگی از هرمزگان، نیمهٔ جنوبی کرمان، و استان سیستان و بلوچستان است که تقریباً دارای تمرکز بالای سالانهٔ گردوغبار در کل منطقه است (شکل c۲). اوج گردوغبار این منطقه در فصل تابستان (شکل ۳ c) و همزمان با استقرار باد ۱۲۰روزه (اواسط ماه می تا سپتامبر) بر روی منطقه است که از منابع داخلی تولید گردوغبار همچون بسترهای خشک جازموریان، دشت سیستان، دشت لوت، و دشت‌های نوار ساحلی مکران تغذیه می‌شود. افزایش بار بالای گردوغبار منطقه در شکل ۴ (c) به‌روشنی نشان می‌دهد که جنوب‌شرق ایران تحت تأثیر منابع داخلی و بیرونی گردوغبار است. به این صورت که بار بالای گردوغبارها از یک طرف برخاسته از دشت سیستان، دشت لوت، و بستر جازموریان است و، از طرف دیگر، تحت تأثیر هجوم گردوغبارهای منشأگرفته از مناطق بیابانی شبه‌جزیرهٔ عربستان است.



شکل ۲. نقشهٔ میانگین مکانی سالانهٔ گردوغبار در مناطق تفکیک‌شده بر پایهٔ بارگویه‌های چرخش‌داده‌شده

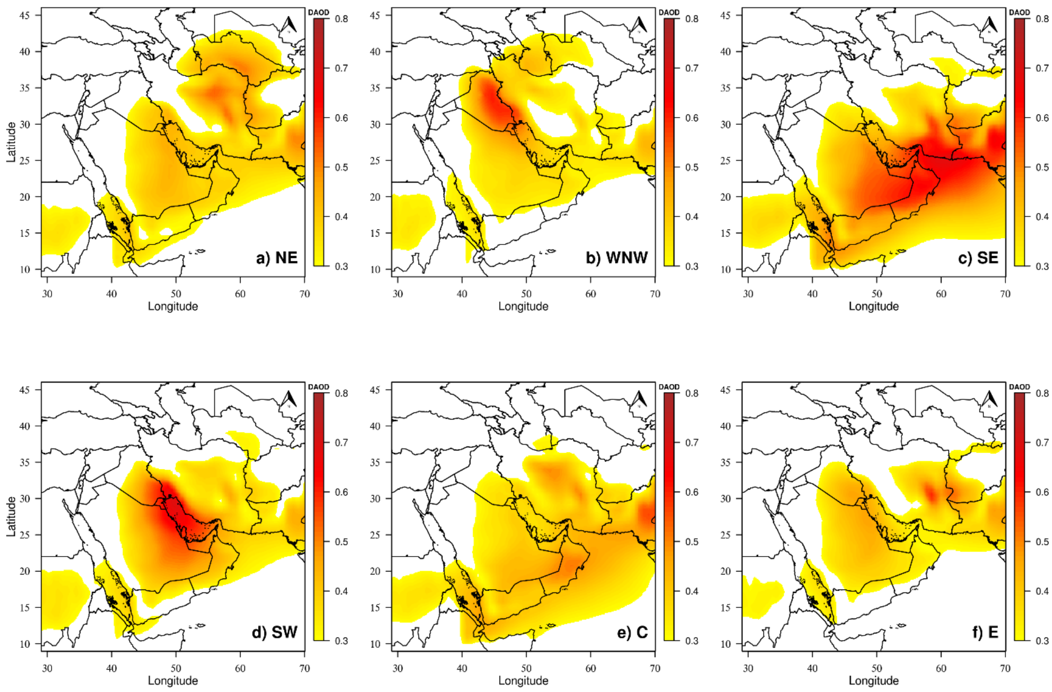
منطقهٔ جنوب‌غرب کشور ازجمله مناطق دیگر شناسایی‌شده با بار بیش از ۰٫۵ تفکیک‌شده است (شکل ۱ d) و در طول نوار ساحلی خلیج فارس (شامل بخش جنوبی استان‌های ایلام و لرستان و استان‌های خوزستان، فارس، کهکیلویه و بویراحمد، چهارمحال و بختیاری، فارس، و بوشهر در طول زاگرس و غرب آن) با میزان بالای سالانهٔ گردوغبار در طول نوار ساحلی و دشت‌های خوزستان قابل مشاهده است (شکل ۲ d). میزان گردوغبار منطقهٔ جنوب‌غرب ایران پیوسته افزایش چشم‌گیری را نشان می‌دهد و دارای دو اوج بهاری و تابستانی در چرخهٔ هرساله است (شکل ۳ d). با نگاه اجمالی به شکل ۴ (d) نیز می‌توان مشاهده کرد که مجاورت منطقه با بیابان‌های عمدهٔ شبه‌جزیرهٔ عربستان، عراق– سوریه، و دشت‌های رسوبی مجاور (دجله و فرات) به همراه منابع داخلی (بسترهای خشک خوزستان و سواحل خلیج فارس) دلیل

اصلی انتشار و افزایش حجم بالای گردوغبار منطقه است. منطقهٔ پنجم شناسایی‌شده گردوغبار که دارای بار مثبت است متعلق به ناحیهٔ مرکزی ایران است (شکل ۱ e) که در شمال به‌وسیلهٔ رشته‌کوه البرز، در غرب توسط رشته‌کوه زاگرس، و در شرق به‌وسیلهٔ کوهستان‌های شمالی- جنوبی محصور شده است و مثلث بیابان لوت در جنوب- دریاچهٔ نمک در غرب- دشت کویر مرکز ثقل منطقهٔ گردوغبار سالانهٔ فلات مرکزی است (شکل ۲ e). چرخهٔ سالانه میزان گردوغبارها (شکل ۳ e) در منطقهٔ مرکزی نشان می‌دهد که اوج گردوغبار متعلق به فصل گرم است که ارتباط معکوسی با رطوبت خاک و ارتباط مستقیمی با شرایط توپوگرافی و اختلاف گرادیان دینامیکی نسبت به اطراف دارد. بنابراین، همهٔ عوامل موجب شده تا منطقه تحت تأثیر گردوغبار منتشرشده از مناطق کویری داخلی قرار گیرد (شکل ۴ e).



شکل ۳. توزیع روزانهٔ گردوغبار به تفکیک مناطق شناسایی‌شده

سرانجام، ششمین منطقهٔ شناسایی‌شدهٔ گردوغبار، با مرکزیت بیابان لوت و دشت سیستان (در نوار مرزی با افغانستان)، با بار بالای ۰٫۵ بر روی جو شرق کشور جداسازی شده است (شکل ۱ f). غلظت بالای گردوغبارهای سالانهٔ شرق ایران مطابق با توپوگرافی پست و اقلیم خشک بوده و شامل استان‌های خراسان جنوبی، شرق یزد، بخش بزرگی از شرق کرمان، و شمال سیستان و بلوچستان است (شکل ۲ f). این منطقهٔ گردوغباری دارای تغییرات مشهود فصلی گردوغبارها و اوج آن‌ها در اواخر بهار تا تابستان است (شکل ۳ f) که به زمان شروع و تشدید باد ۱۲۰روزه در شرق برمی‌گردد. به‌علاوه اینکه منطقهٔ یادشده دارای دو منبع خشک رسوبی داخلی دشت سیستان در شرق و بیابان لوت در غرب است که تحت تأثیر توپوگرافی و دینامیک جوی حاکم بر منطقه طوفان‌های مخربی را به جو منطقه تزریق می‌کنند. همین شرایط خشک و تأثیر اُروگرافی محلی با سامانه‌های جوی غالب موجب تشدید باد شُمالی بر روی بسترهای مستعد و خشک رسوبی- دریاچه‌ای مشترک بین ایران–افغانستان و بیابان لوت شده و انتشار بار بالای گردوغبار در منطقهٔ شرق را شدت بخشیده است (شکل ۴ f). بنابراین، منابع مستعد و خشک بسترهای رسوبی داخلی و هم‌جواری منطقهٔ شرق با بیابان‌های بیرونی واقع در افغانستان موجب تشدید بار گردوغبار در منطقهٔ شرق ایران شده است.



شکل ۴. نقشهٔ پراکنش منطقه‌ای میانگین فرین‌های گردوغبار در مناطق شناسایی‌شده

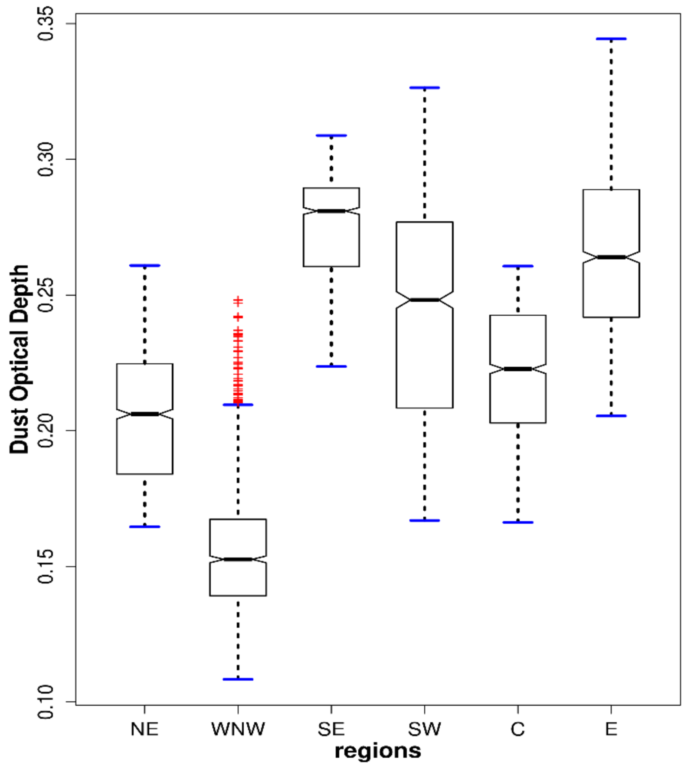
همچنان‌که در شکل ۲ مقدار گردوغبار مناطق شناسایی‌شده به تفکیک وسعت مناطق نشان داده شد، جدول ۲ همبستگی بین میانگین دوبه‌دوی سری‌های زمانی آن‌ها را نشان می‌دهد. بر طبق جدول ۲، بین مناطق غرب- شمال غرب با شمال‌شرق همبستگی معنی‌داری (۰٫۶۸) وجود دارد. این همبستگی به نوسان مشابه فصلی گردوغبار در دو منطقه یا شباهت مناطق منبع گردوغبار در نتیجهٔ طغیان طوفان‌ها از بیابان قره‌قوم تا غرب دریای خزر ارتباط دارد که در برخی مواقع با تحت تأثیر قراردادن غرب دریای خزر واقع در شرق منطقهٔ غرب- شمال‌غرب، تغییرات فصلی مشابهی را دنبال می‌کنند. اما، آزمون عدم شباهت بین گروهی (جدول ۲) بین دو منطقه از نظر آماری معنی‌دار و دارای فاصلهٔ زیاد

(D = 0.71) است. بدین معنی که دو منطقه از هم مستقل بوده و دارای شباهت درون‌گروهی نیستند. در شکل ۵، توزیع میانگین مکانی مقدار گردوغبار در مناطق شناسایی‌شده و در جدول ۲ فاصلهٔ بین گروهی آن‌ها نشان داده شده است. محدودیت باکس‌ها در شکل ۵ نشان می‌دهد که میانگین سری زمانی مناطق شناسایی‌شده با هم متفاوت‌اند؛ زیرا مناطق شناسایی‌شده دارای منابع انتشار گردوغبار مشترکی نیستند. این شواهد برای میانگین سری زمانی منطقهٔ غرب–شمال‌غرب نشان داد که این منطقه نسبت به دیگر مناطق مستقل‌تر است؛ زیرا منطقه دارای منابع محدودتر و فصل اوج رخدادها در بهار است که به تفاوت فصلی حجم و گسترش گردوغبار در این فصل بر روی منطقه برمی‌گردد. برعکس، تغییرات و حجم شدید گردوغبار (شکل ۵) بر روی منطقهٔ جنوب‌غرب نشان‌دهندهٔ مجاورت منطقه با منابع عمدهٔ گردوغبارهای خاورمیانه و تشدید بار گردوغبار در این منطقه است (شکل d۴). همچون منطقهٔ جنوب‌غرب، حجم بالای گردوغبار بر روی منطقهٔ جنوب‌شرق نیز درک درستی از انتشار گردوغبار مناطق متعدد منبع و جریان‌های غالب به منطقه را نشان می‌دهد. با وجود این، توزیع توابع تجمعی تجربی (CDF[1]s) آزمون K-S برای هر کدام از مناطق تحت تأثیر گردوغبار در جدول ۲ ارائه شده است که درک استقلال عددی میانگین مناطق گردوغباری را نسبت به هم و با استفاده از آمارهٔ D (در سطح اطمینان یک درصد) نشان می‌دهد. مقایسهٔ CDF منطقهٔ غرب–شمال‌غرب نسبت به مناطق دیگر نشان می‌دهد (جدول ۲) که میانگین گردوغبار در منطقهٔ شمال‌غرب مستقل‌تر و متفاوت‌تر از دیگر مناطق است و نشان‌دهندهٔ این است که منطقه تحت تأثیر رژیم‌های جداگانهٔ گردوغبار قرار داشته است. در مقابل، فاصلهٔ کم بین جنوب‌غرب با جنوب‌شرق و مرکز ایران نشان می‌دهد که هر سه منطقه تحت تأثیر سامانه‌های انتقال و انتشار مشترک‌اند. در ضمن، باید دقت شود که در جنوب‌شرق کشور به دلیل فراوانی و تنوع منابع تولید گردوغبار و سامانه‌های غالب جوی (باد ۱۲۰روزه و بادهای موسمی جنوب‌غربی) حجم بالایی از گردوغبار بر روی منطقه مشاهده می‌شود (شکل‌های ۲ و ۴). اما، در عین حال، عدم همبستگی و فاصلهٔ آماری آزمون K-S شمال‌شرق با شرق (۰٫۶۲) و جنوب‌شرق (۰٫۸) تأیید می‌کند (جدول ۲) که میانگین رخدادهای گردوغباری منطقهٔ شمال‌شرق متأثر از منبع، فصل، یا سامانه‌های متفاوتری نسبت به جنوب‌شرق هستند.

جدول ۲. ضریب همبستگی (داخل پرانتز) و آزمون کولموگروف- اسمیرنوف (بیرون پرانتز: آمارهٔ D در سطح معنی‌داری ۱٪) بین میانگین سالانهٔ گردوغبار مناطق شناسایی‌شده

	شمال‌شرق	غرب–شمال‌غرب	جنوب‌شرق	جنوب‌غرب	فلات مرکزی	شرق
شمال‌شرق	۰ (۱)	۰٫۷۱ (۰٫۶۸)	۰٫۸۰ (۰٫۳۸)	۰٫۴۰ (۰٫۱۱)	۰٫۲۰ (۰٫۴۲-)	۰٫۶۲ (۰٫۴۳)
غرب- شمال‌غرب		۰ (۱)	۰٫۹۵ (۰٫۴۱)	۰٫۷۶ (۰٫۲۱)	۰٫۷۸(۰٫۳۶-)	۰٫۹۳ (۰٫۳۵)
جنوب‌شرق			۰ (۱)	۰٫۴۰ (۰٫۱۲)	۰٫۷۲ (۰٫۲۲-)	۰٫۲۵ (۰٫۲۱)
جنوب‌غرب				۰ (۱)	۰٫۳۸ (۰٫۰۷-)	۰٫۲۸ (۰٫۰۸)
فلات مرکزی					۰ (۱)	۰٫۴۹ (۰٫۲۵-)
شرق						۰ (۱)

1. Cumulative distribution functions



شکل ۵. نمودار جعبهٔ میانگین سالانهٔ گردوغبار در سطح مناطق شناسایی‌شده

بحث و نتیجه‌گیری

ایران با چندین کشور خشک و نیمه‌خشک همچون عراق و سوریه در غرب، عربستان در جنوب و جنوب‌غرب، بیابان‌های افغانستان در شرق، بیابان قره‌قوم ترکمنستان و بسترهای رسوبی شرق دریای خزر در شمال و شمال‌شرق محصور شده است. این مراکز عمدهٔ بیرونی با دشت‌های داخلی همچون سیستان، کویر و لوت و بسترهای دریاچه‌ای خشک داخلی تلفیق و موجب شده‌اند تا کشور تحت تأثیر هواویزه‌های معدنی فراوانی قرار داشته باشد. بر پایهٔ همین استدلال، در تحقیق حاضر با استفاده از تکنیک‌های بُرداری و معیار سنجش از دور ماهواره‌ای تلاش شد تا الگوهای مکانی توزیع گردوغبار کشور تفکیک و شناسایی شود. نتایج مطالعه نشان داد شش منطقهٔ جداگانهٔ شمال‌شرق، غرب- شمال‌غرب، جنوب‌شرق، جنوب‌غرب، مرکز و شرق در ایران تفکیک و شناسایی شد. به‌علاوه، روابط آماری بین سری‌های زمانی و توزیع مکانی فرین‌های منطقه‌ای نشان داد که منابع انتشار و انتقال گردوغبار نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری مناطق شناسایی‌شدهٔ گردوغبار داشت. زیرا، مجاورت مناطق شش‌گانه با منابع بیابانی متفاوت بودند. به این صورت که در معرض قرارگیری منطقهٔ شمال‌شرق با گردوغبارهای منشأگرفته از بیابان قره‌قوم در شمال و دشت کویر در جنوب تحت سلطهٔ جریان‌های پُرفشار دریای خزر در طول مرز ایران و افغانستان و بادهای سطح زمین ناشی از گردایان ارتفاعات البرز با مناطق پست داخلی (علیزاده چوبری و همکاران، ۲۰۱۴: ۳۳۱؛ کاسکائوتیس و همکاران، ۲۰۱۵: ۴۱۹) موجب تشدید انتشار گردوغبار و شکل‌گیری منطقهٔ شمال‌شرق شده است. این شیوه از منطقه‌بندی در مطالعات پیشین به‌عنوان یک منطقهٔ مستقل جغرافیایی تفکیک نشده بود (باغبانان و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۴۴۷؛ علیزاده چوبری و همکاران، ۲۰۱۶: ۲۰۵۶). زیرا، دید افقی همانند متغیر عمق نوری تولیدات ماهواره‌ای قادر به پوشش منطقه نبوده است. به‌علاوه، شناسایی

طوفان بر مبنای دید افقی ایستگاه سبب می‌شود تا عمق زیاد لایهٔ گردوغبار در سطوح بالاتر وردسپهر (به دلیل ارتفاع زیاد لایهٔ گردوغبار از سطح زمین) در سطح ایستگاه به‌عنوان رخداد حدی ثبت نشود. موضوع مورد بحث در ارتباط با مناطق شرق، جنوب‌شرق، و فلات مرکزی نیز صادق است. اگرچه، غلظت، انتشار، و انتقال گردوغبار از دشت سیستان به‌وسیلهٔ باد ۱۲۰روزه دلیل اصلی انتشار گردوغبار در شرق ایران است (علیزاده چوبری و همکاران، ۲۰۱۴: ۳۳۱؛ راشکی و همکاران، ۲۰۱۹: ۳۳)، ضعف و شدت فرین‌های مناطق تحت تأثیر گردوغبار نشان داد که تعدد منابع گردوغبار مجاور و جریان آن در جنوب‌شرق و شرق کشور متمایزند و نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری مناطق گردوغباری شرق و جنوب‌شرق داشتند. این موضوع در کانون توجه مطالعات ایستگاهی در تمام طول محدودهٔ جغرافیایی شرق تا جنوب‌شرق (پرایجاث و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۴۲؛ جیش پراکاس و همکاران، ۲۰۱۵: ۲۰۳) و خوشه‌بندی، درون‌یابی، و تحلیل تغییرات فصلی ایران (داده‌های ماهانه) (علیزاده چوبری و همکاران، ۲۰۱۶: ۲۰۵۶؛ باغبانان و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۴۴۷) بررسی شده است؛ اما به تفکیک و مرزبندی مناطق اشاره نشده است. همچنین، یافته‌های روش‌شناسی پژوهش حاضر با استفاده از معیار سنجش از دوری عمق نوری گردوغبار درک ساده‌تر و منطقی‌تری از جداسازی مرز بین مناطق غرب–شمال‌غرب و جنوب‌غرب بر فراز جو نیمهٔ غربی ایران را نشان داد. زیرا، شناسایی رخدادها بر پایهٔ مشاهدات ایستگاه سینوپتیک موجب دخالت سلیقهٔ محقق در انتخاب طوفان‌های مهم و عمده بوده است که، بر اساس دید افقی، مطالعه شده‌اند (علیزاده چوبری و همکاران، ۲۰۱۴: ۳۳۱؛ نامداری و همکاران، ۲۰۱۸: ۲۶۷). استخراج فرین‌های تأثیرگذار بر روی دو منطقهٔ نیمهٔ غربی شناسایی‌شده در مطالعهٔ حاضر به‌وسیلهٔ مطالعه‌های پیشین تأیید می‌شود و هر دو به گسترش تودهٔ گردوغبار منشأگرفته از بیابان‌های عراق– سوریه و حوضه‌های رسوبی دجله– فرات تا غرب دریای خزر تحت تأثیر گسترش کم‌فشار عراق در فصل بهار اشاره دارند (حمیدی و همکاران، ۲۰۱۳: ۲۸۳؛ نامداری و همکاران، ۲۰۱۸: ۲۷۱). در مقابل، اگر زبانهٔ کم‌فشار تضعیف شود و به عرض جغرافیایی پایین‌تر بر روی خلیج فارس قرار گیرد، انتقال گردوغبار در جهت همگرایی سیکلونی بادها را از شرق و شمال‌شرق شبه‌جزیرهٔ عربستان و از روی بیابان‌های عراق– سوریه به سمت جلگهٔ خوزستان سوق داده و بیشترین حجم گردوغبار به جنوب‌غرب برخورد می‌کند (فتاحی و همکاران، ۲۰۱۲: ۴۹؛ حمیدی و همکاران، ۲۰۱۳: ۲۸۴؛ راشکی و همکاران، ۲۰۱۹: ۳۴) و این جابه‌جایی جریان‌ها موجب شده است تا منطقهٔ جنوب‌غرب ایران را به‌صورت یک منطقهٔ مجزا شکل دهد. بنابراین، تفاوت چشم‌گیر تحقیق حاضر در این مسئله است که مطالعات پیشین بر اساس رخدادهای فرین موردی به بررسی موضوع گردوغبار پرداخته و قادر به تحلیل نقطه‌ای گردوغبار بوده‌اند. اما، مطالعهٔ اخیر نه‌تنها توانست استان‌های شمالی و جنوبی نیمهٔ غربی، نیمهٔ شرقی، و مرکز کشور را با رویکرد منطقه‌بندی جدا کند، بلکه با استفاده از تغییرات دوره‌ای و فرین‌های گردوغبار هر منطقه به تحلیل پرداخته است. این دستاورد، علاوه بر اینکه به‌وسیلهٔ تحقیقات پیشین دینامیکی و سینوپتیکی مورد تأیید است، بلکه توانسته است مرز مناطق تحت تأثیر گردوغبار را در یک نگاه تکنیکی به ساختارهای جغرافیایی کوچک‌تر (بدون درنظرگرفتن مرز استان و نقاط ایستگاه‌ها) ساده کند. درمجموع، موضوع طبقه‌بندی به این مهم منجر شد که محیط فیزیکی و پراکنش متغیر مورد مطالعه با استفاده از شبیه‌سازی داده‌های سنجش از دور در یک ساختار جغرافیایی معنی‌دار و در عین حال ساده ترسیم‌شدنی و قابل تفسیر است.

منابع

Abdi Vishkaee, F.; Flamant, C.; Cuesta, J.; Flamant, P. and Khalesifard, H.R. (2011). Multiplatform observations of dust vertical distribution during transport over northwest Iran in the summertime. J. Geophys. Res. 116(1): 2-13.

Alizadeh Choobari, O.; Zawar-Reza, P. and Sturman, A. (2013). Low level jet intensification by mineral dust aerosols. Ann. Geophysicae. 31(4): 625-632.

Alizadeh-Choobari, O.; Ghafarian, P. and Owlad, E. (2016). Temporal variations in the frequency and concentration of dust events over Iran based on surface observations. International Journal of Climatology. 36(1): 2050-2062.

Alizadeh-Choobari, O.; Zawar-Reza, P. and Sturman, A. (2014). The "wind of 120 days" and dust storm activity over the Sistan Basin. Atmospheric Research. 143(1): 328-341.

Arkian, F. and Nicholson, S. E. (2018). Long-term variations of aerosol optical depth and aerosol radiative forcing over Iran based on satellite and AERONET data, Environ Monit Assess. 190(1): 1-15.

Awad, A. and Mashat, A.W. (2014). The Synoptic Patterns Associated with Spring Widespread Dusty Days in Central and Eastern Saudi Arabia. Atmosphere. 5(1): 889-913.

Baghbanan, P.; Ghavidel, Y. and Farajzadeh, M. (2019). Spatial analysis of spring dust storms hazard in Iran. Theor Appl Climatol. 139(1): 1447-1457.

Bangert, M.; Nenes, A.; Vogel, B.; Vogel1, H.; Barahona, D.; Karydis, V. A.; Kumar, P.; Bangert, M.; Nenes, A.; Vogel, B.; Vogel, H.; Barahona, D.; Karydis, V. A.; Kumar, P.; Kottmeier, C. and Blahak, U. (2012). (2012). Saharan dust event impacts on cloud formation and radiation over Western Europe. Atmospheric Chemistry and Physics.12(1): 4045-4063.

Barry, R.G. and Carleton, A.M. (2001). Synoptic and Dynamic Climatology. Routledge. London.

Benedetti, A.; Morcrette, J.-J.; Boucher, O.; Dethof, A.; Engelen, R. J.; Fisher, M.; Flentjes, H.; Huneeus, N.; Jones, L.; Kaiser, J. W.; Kinne, S.; Mangold, A.,; Razinger, M.; Simmons, A. J.; Suttie, M.; GEMS-AER, Team (2009). Aerosol analysis and forecast in the ECMWF Integrated Forecast System. Part II: Data assimilation. Journal of Geophysics Research. 114(1): 1-18.

Boloorani, A.D.; Nabavi, S.O.; Bahrami, H.A.; Mirzapour, F.; Kavosi, M.; Abasi, E. and Azizi, R. (2014). Investigation of dust storms entering Western Iran using remotely sensed data and synoptic analysis. Iranian Journal of Environmental Health Science. 12(1): 1-12.

Cao, H.; Amiraslani, F.; Liu, J. and Zhou, N.(2015). Identification of dust storm source areas in West Asia using multiple environmental datasets. Science of the Total Environment, 502(1): 224-235.

Cattell, R. B. (1966). The scree test for the number of factors. Multivariate Behavioral Research. 1(1): 245-276.

Cerny, C.A. and Kaiser, H.F. (1977). A study of a measure of sampling adequacy for factor-analytic correlation matrices. Multivariate Behavioral Research. 12(1): 43-47.

Compagnucci, Rosa H. and Salles, Maria A. (1997). Surface Pressure Patterns During The Year Over Southern South America. International Journal of Climatology. 17(1): 635-653.

Compagnucci Rosa, H. and Richman, M. B. (2008). Can principal component analysis provide atmospheric circulation or teleconnection patterns?. International Journal of Climatology. Vol 28(1): 703-726.

Das, S.; Dey, S.; Dash, S.K.; Giuliani, G. and Solmon, F. (2015). Dust aerosol feedback on the Indian summer monsoon: sensitivity to absorption property. Journal of Geophysics Research. 12(1): 9642-9652.

Fattahi, E.; Noohi, K. and Shiravand, H. (2012). Study of dust storm synoptical patterns in southwest of Iran. Desert. 17(1): 49-55.

Gkikas, A.; Hatzianastassiou, N. and Mihalopoulos, N. (2009). Aerosol events in the broader Mediterranean basin based on 7-year (2000–2007) MODIS C005 data. Annales Geophysicae. 27(1): 3509-3522.

Goudie, A. and Middelton, N. (2006). Desert Dust in the Global System. Springer

Hamidi, M.; Kavianpour, M.R. and Shao, Y. (2013). Synoptic analysis of dust storms in the Middle East. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences. 49(1): 279-286.

Hamidi, M.; Kavianpour, M.R. and Shao, Y. (2017). A quantitative evaluation of the 3–8 July 2009 Shamal dust storm. Aeolian Research. 24(1): 133-143.

Huth, R. (1996). An intercomparison of computer-assisted circulation classification methods. International Journal of Climatology. 16: 893-922.

Huth, R.; Nemesova, I. and Klimperov, N. (1993). Weather categorization based on the average linkage clustering technique: an application to European mid-latitudes. International Journal of Climatology. 13(1): 817-835.

Islam, M. N. and Almazroui, M. (2012). Direct effects and feedback of desert dust on the climate of the Arabian Peninsula during the wet season: a regional climate model study, Climate Dynamics. 39(1): 2239-2250.

Jish Prakash, P.; Stenchikov, G.; Kalenderski, S.; Osipov, S. and Bangalath, H. (2015). The impact of dust storms on the Arabian Peninsula and the Red Sea. Atmospheric Chemistry and Physics. 15(1): 199-222.

Jolliffe, IT.; Uddin, M. and Vines, SK. (2002). Simplified EOFs-three alternatives to rotation. Climate Research. 20(1): 271-279.

Kaiser, H. F. (1958). The Varimax criterion for analytic rotation in factor analysis, Psychometrika. 23(3): 187-200.

Kaiser, H. F. (1959). Computer program for Varimax rotation in factor analysis, Educ. Psych. Meas. 19(3): 413-420.

Kaskaoutis, D. G.; Rashki, A.; Houssos, E. E.; Mofidi, A.; Goto, D.; Bartzokas, A.; Francois, P. and Legrand, M. (2015). Meteorological aspects associated with dust storms in the Sistan region, southeastern Iran. Climate Dynamics, 45(2): 407-424.

Kaskaoutis, D.G.; Houssos, E.E.; Minvielle, F.; Rashki, A.; Chiapello, I.; Dumka, U.C. and Legrand, M. (2018). Long-term variability and trends in the Caspian Sea – Hindu Kush Index: influence on atmospheric circulation patterns, temperature and rainfall over the Middle East and southwest Asia. Global and Planetary Change. 169(1): 16-33.

Kaskaoutis, D.G.; Houssos, E.E.; Rashki, A.; Francois, P.; Legrand, M.; Goto, D.; Bartzokas A.; Kambezidis, H.D. and Takemura, T. (2016). The Caspian Sea – Hindu Kush Index (CasHKI): a regulatory factor for dust activity over southwest Asia. Global and Planetary Change. 137(1): 10-23.

Klingmüller, K.; Andrea, P.; Swen, M.; Georgiy L. Stenchikov and Lelieveld, J. (2016). Aerosol optical depth trend over the Middle East. Atmospheric Chemistry and Physics. 16(8): 5063-5073.

Kostopoulou, E. and Jones, P. D. (2007). Comprehensive analysis of the climate variability in the eastern Mediterranean. Part I: map-pattern classification, International Journal of Climatology. 27(9): 1189-1214.

Middleton, N.J. (1986). Dust storms in the Middle East. J. Arid Environ. 10: 83-96.

Morcrette, J.-J.; Boucher, O.; Jones, L.; Salmond, D.; Bechtold, P.; Beljaars, A.; Benedetti, A.; Bonet, A.; Kaiser, J. W.; Razinger, M.; Schulz, M.; Serrar, S.; Simmons, A. J.; Sofiev, M.; Suttie, M.; Tompkins, A. M. and Untch, A. (2009). Aerosol analysis and forecast in the ECMWF integrated forecast system. Part I: Forward modelling. Journal of Geophysical Research. 114(D06206): 1-17.

Nabavi, S. O.; Haimberger, L. and Samimi, C. (2017). Sensitivity of WRF-chem predictions to dust source function specification in West Asia, Aeolian Research. 24(1): 115-131.

Nabavi, S.O.; Haimberger, L. and Samimi, C. (2016). Climatology of dust distribution over West Asia from homogenized remote sensing data, Aeolian Research. 21(1): 93-107.

Namdari, S.; Karimi, N.; Sorooshian, A.; Mohammadie, Gh.H. and Sehatkashani, S. (2018). Impacts of climate and synoptic fluctuations on dust storm activity over the Middle East. Atmospheric Environment. 173(1): 265-276.

North, G.R.; Bell, T.L.; Cahalan, R.F. and Moeng, F.J. (1982). Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. Monthly Weather Review. 110(1): 699-706.

Prijith, S.S.; Rajeev, K.; Thampi, B.V.; Nair, S.K. and Mohan, M. (2013). Multi-year observations of the spatial and vertical distribution of aerosols and the genesis of abnormal variations in aerosol loading over the Arabian Sea during Asian summer monsoon season. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 105-106(1): 142-151.

Prospero, J.; Ginoux, M.; Torres, P.; Nicholson, S. E. and Gill, T. E. (2002). Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the NIMBUS 7 total ozone mapping spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product, Reviews of Geophysics. 40(1): 2-31.

Rashki, A.; Kaskaoutis, D.G.; Mofidi, A.; Minvielle, F.; Chiapello, I.; Legrand, M.; Dumka, U.C. and Francois, P. (2019). Effects of Monsoon, Shamal and Levar winds on dust accumulation over the Arabian Sea during summer – The July 2016 case. Aeolian Research. 36(1): 27-44.

Rashki, A.; Kaskaoutis, D. G.; Francois, P.; Kosmopoulos, P.G. and Legrand, M. (2015). Dust – storm dynamics over Sistan Region, Iran: seasonality, Transport, characteristics and affected areas, Aeolian research. 16(1): 35-48.

Rashki, A.; Kaskaoutis, D.G.; Rautenbach, C.J.W.; Eriksson, P.G.; Qiang, M. and Gupta, P. (2012). Dust storms and their horizontal dust loading in the Sistan region, Iran. Aeolian Research. 5(1): 51-62.

Rezazadeh, M.; Irannejad, P. and Shao, Y. (2013). Climatology of the Middle East dust events. Aeolian Research. 10(1): 103-109.

Richman, M.B. (1981). Obliquely rotated principal components: an improved meteorological map typing technique?, Journal of Applied Meteorology. 20(1): 1145-1159.

Richman, M.B. (1986). Review article. Rotation of principal components. Journal of Climatology. 6(1): 293-335.

Serra, C.; Fernandez Mills, G.; Periago, M.C. and Lana, M. (1996). Winter and autumn daily precipitation patterns in Catalonia, Spain. Theoretical and Applied Climatology. 54(1): 175-186

Shen, S.S.P.; Wied, O.; Weithmann, A.; Regele, T.; Bailey, B.A. and Lawrimore, J.H. (2015). Six temperature and precipitation regimes of the contiguous United States between 1895 and 2010: a statistical inference study. Theoretical and Applied Climatology. 125(1): 197-211.

Wang, W.; Chen, X.; Shi, P. and van Gelder PHAJM (2008). Detecting changes in extreme precipitation and extreme streamflow in the Dongjiang River Basin in southern China. Hydrology and Earth System Sciences. 12(1): 207-221.

White, D.; Richman, M. and Yarnal, B. (1991). Climate regionalization and rotation of principal components. International Journal of Climatology. 11(1): 1-25.

Yarnal, B. (1993). Synoptic Climatology in Environmental Analysis. Belhaven Press. London.

Yarnal, B.; Comrie, A.C.; Frakes, B. and Brown, D.P. (2001). Developments and prospects in synoptic climatology. International Journal of Climatology. 21(1): 1923-1950.

Zoljoodi, M.; Didevarasl, A. and Ranjbar Saadatabadi, A. (2013). Dust Events in the Western Parts of Iran and the Relationship with Drought Expansion over the Dust-Source Areas in Iraq and Syria. Atmospheric and Climate Sciences. 3(1): 321-336.